
LYÖNTIPAALUN VALINTA



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Hämeenlinna, kevät 2017

Jyri Jokinen



HAMK Visamäki
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Yhdyskuntatekniikka

Tekijä	Jyri Jokinen	Vuosi 2017
Työn nimi	Lyöntipaalun valinta	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö tehtiin HTM Yhtiöt Oy:lle, joka on 1981 perustettu teräs- ja paalutuotteita valmistava perheyhtiö.

Työn tavoitteena oli selvittää kolmen eri pienlyöntipaalutyypin ominaisuuksia, käyttökohteita ja työskentelytapoja. Eri paalutyypit olivat HTM:n valmistamat pienteräsllyöntipaalu ja teräsbetonipaalu sekä Lujabetonin valmistama pienpaalu. Tarkoituksena oli löytää tietoa ja näkemyksiä eri paalujen hyödyistä keskittymättä liikaa kustannusperäiseen vertailuun.

Työn tietojen etsintään käytettiin sekä kirjallisuutta että internetlähteitä. Lisäksi kustannuksille on saatu taustaa erilaisista tarjouspyynnöistä. Opinnäytetyön teoria perustuu paalutuksen suunnittelussa käytettävään paalutusohjeeseen. Työn teon aikana voimassa oli Paalutusohje 2011.

Paalutusta suunniteltaessa pyritään valitsemaan materiaalit ja työtavat niin, että kustannukset saataisiin mahdollisimman alhaisiksi. Työtä tehdessä kuitenkin huomattiin, että paalutuksella on suuria vaikutuksia ympäröiviin maakerroksiin, rakennuksiin ja rakenteisiin. Tästä johtuen halvin vaihtoehto ei aina sovellu rakennettavaan kohteeseen.

Vertailusta pystyi toteamaan, että teräspaalu on materiaalina puolesta kallein, mutta samalla kevyin vaihtoehto ja sitä käytetäänkin vain ahtaammissa ja herkemmissä kohteissa. Teräsbetoni on Suomessa eniten käytetty paalumateriaali, koska sillä on suuri kantavuus mutta alhaiset kustannukset. Teräsbetoni on kuitenkin raskasta, ja käsittely vaatii paljon tilaa. Lisäksi vaikutukset ympäröivään maastoon ovat suuremmat kuin teräspaalulla. Lujapienpaalu on kaikilla osa-alueilla varteenotettava vaihtoehto. Se on helppoa ja nopeaa asentaa, eikä hukkaa pääse juurikaan muodostumaan. Lujapienpaalun käyttöä rajaa eniten sen heikko kantavuus, joten sen käyttö kohdistuu pieniin ja kevyisiin paalutuskohteisiin.

Avainsanat paalutus, perustus, pohjarakentaminen

Sivut 27 s. + liitteet 4 s.

HAMK, Visamäki
Degree Programme in Construction Engineering
Civil Engineering

Author	Jyri Jokinen	Year 2017
Subject of Bachelor's thesis	Choosing Driven Pile	

ABSTRACT

This Bachelor's thesis was commissioned by HTM Yhtiöt Oy, which is a family company set up in 1981 to make piles and steel products. The main goal of the thesis was to find out main qualities, uses and ways of installing three different kind of piles. The piles compared in the thesis were HTM's own steel piles, reinforced concrete piles and Lujabetoni's small concrete piles. The purpose was to find views and knowledge of the benefits of different piles without focusing too much only in costs.

Both literature and Internet sources were used to find information for the thesis. Additional information was obtained from various offer requests. The theoretical information of the thesis is based on the directive Paalutusohje 2011.

When planning pile-driving, the objective is to keep costs at a minimum. Nevertheless, while doing this study it was found out that pile-driving has major effects on the surrounding layers of ground, buildings and structures. Due to this it is sometimes impossible to use the cheapest option.

The comparison showed that steel is most expensive material to use in piles. Yet it is also the lightest and therefore used on narrow and more delicate construction sites. Reinforced concrete is the most used pile material in Finland. This is mainly because it has great bearing properties and it's cheap. On the other hand, the piles are very heavy and handling them requires plenty of space. Reinforced concrete piles also have a greater impact on their surroundings than steel piles. Lujabetoni's small concrete pile is in every aspect a considerable option. It is very easy and light to install and handle with very little waste left behind. Probably the biggest limitation of these small concrete piles is their low bearing capability. That is the reason why they are mainly used on small and light pile-driving sites

Keywords pile-driving, foundation, construction

Pages 27 p. + appendices 4 p.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	ERI PAALUTYYYPIT JA NIIDEN KÄYTTÖKOHTEET	2
3	LYÖTÄVÄT PIENPAALUT	3
3.1	Paalutustyöohje PO 2011	3
3.2	Lyötävät teräksiset pienpaalut	3
3.3	Teräsbetonipaalut	4
3.4	Luja-pienpaalu.....	5
4	PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU	8
4.1	Paalutyyppin valinta.....	8
4.1.1	Paalutustyöluokka.....	8
4.1.2	Geotekninen kestävyys	9
4.1.3	Rakenteellinen kestävyys	10
4.1.4	Kuormat.....	10
4.1.5	Pohjatutkimukset	11
4.2	Paaluperustus.....	12
4.2.1	Ympäristövaikutukset.....	12
4.2.2	Päästöt ja vaaralliset aineet.....	13
4.2.3	Korroosio	13
4.2.4	Melu ja värinä.....	14
4.2.5	Kaltevuudet.....	15
4.2.6	Pysty- ja vaakasuuntaiset siirtymät	15
4.3	Paalutustyö	16
4.3.1	Paalujen vastaanotto, varastointi ja siirtäminen	16
4.3.2	Paalutus lyömällä.....	17
4.3.3	Paalun jatkaminen	18
4.3.4	Katkaisu	18
4.3.5	Dokumentointi	19
5	PAALUJEN VERTAILU	20
5.1	Paalutuksen suunnittelu.....	20
5.2	Materiaali	20
5.2.1	Betonointi	21
5.2.2	Ankkurointi.....	21
5.3	Kantavuus.....	21
5.4	Kuljetus ja käsittely	22
5.5	Lyöntityö	23
5.6	Katkaisu.....	23
6	YHTEENVETO	24
6.1	Tulokset.....	24
6.1.1	Pienteräspaalut.....	24
6.1.2	Teräsbetonipaalut	24
6.1.3	Luja-pienpaalu	25

6.2 Yhteenveto	25
LÄHTEET	27

Liite 1	Paalutuspöytäkirja
Liite 2	Teräsbetonipaalujen puristuskestävyys
Liite 3	Luja-pienpaalun puristuskestävyys
Liite 4	Teräspaalujen puristuskestävyys

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin HTM-Yhtiöt Oy:lle, joka on suuri paalujen ja terästuotteiden valmistaja. HTM Yhtiöt Oy on vuonna 1981 perustettu perheyhtiö, jonka päätoimipiste sijaitsee Ryttylässä. Yhtiön palveluihin kuuluvat teräs- ja teräsbetonipaalut, raudoitteet sekä teräslevyt.

Opinnäytetyön aiheena on lyötävien teräsbetoni- ja teräs- sekä Luja-pienpaalujen ominaisuuksien vertailu. Lisäksi työssä tutkitaan eri paalujen vaatimaa kalustoa ja sitä, mitä toimenpiteitä ne työmaalta vaativat. Vertailu tehdään Paalutusohje 2011:n pohjalta. Ohje perustuu eurooppalaisiin ohjeisiin ja standardeihin, joiden muuttumisen takia ohjeita päivitetään säännöllisesti. Edellinen päivitys oli Paalutusohje 2006 ja seuraava on Paalutusohje 2016.

Tavoitteena on saada selkeä kuva siitä, mikä paalu soveltuu mihinkin kohteeseen. Työssä on tarkoitus tutustua eri paaluperustusten kustannuksiin, suunnitteluun ja asennustapoihin.

Työn sisältö rajattiin koskemaan vain pieniä, lyömällä asennettavia paaluja, joiden materiaalit olivat HTM Yhtiöiden teräs ja teräsbetoni ja Lujabetonin teräsbetoninen pienpaalu. Suurpaalut (> 300 mm), poraamalla asennettavat paalut sekä puupaalut jätettiin rajauksen ulkopuolelle.

Opinnäyte koostuu teoriaosuudesta ja vertailuosuudesta. Teoria on koottu pääasiassa kirjallisuudesta ja nettijulkaisuista. Vertailu on toteutettu teorian kautta löydetyn tiedon avulla, mutta siihen on sisällytetty kustannuksiin perustuvaa tietoa, jotka ovat aina työmaakohtaisia.

2 ERI PAALUTYYPIT JA NIIDEN KÄYTTÖKOHTEET

Rakennusallalla Suomessa ylin ohjeistus muodostuu maankäyttö- ja rakennuslaista asetuksineen sekä näiden lakien alaisesta rakentamismääräyskokoelmasta. Rakentamista säätelevät tämän lisäksi erilaiset normit ja ohjeet.

Parhaat rakennusalueet on jo rakennettu valmiiksi. Tästä johtuen myös heikommille maapohjille rakentaminen on tullut ajankohtaiseksi. Ohjeistus edellyttää, että pohjarakenteet toteutetaan siten, että pystytään varmistamaan rakennuksen pitkä käyttöikä. Tärkeänä tekijänä rakentamisessa ovat myös terveellisyys ja kosteusvaurioiden estäminen. Paaluttaminen on syrjäyttänyt maanvaraiset perustukset huonopohjaisilla rakennusalueilla. Lisäksi puurakentamisen sijaan on yleistynyt painuma-arat teräsbetoni- ja tiilirakentaminen. (Jääskeläinen 2009, 9.)

Kun rakennuksen tai rakenteen perustaminen pelkästään maan varaan ei ole mahdollista, käytetään paaluperustusta. Tämä voi johtua maan painumisesta, siirtymisestä tai rakennusten sijainnista tai perustamistavasta. (Jääskeläinen 2009, 52.) Paalutusohje 2011 (2011, 15) määrittelee paalun näin: ”Paalut ovat rakenteita, jotka siirtävät voimia maahan tai kallioon ja jotka voivat sisältää kuormaa siirtäviä elementtejä, jotka suoraan tai epäsuorasti siirtävät kuormia tai rajoittavat muodonmuutoksia.”

Eurooppalaisten standardien mukaan paalut ryhmitellään maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Maata syrjäyttävät paalut asennetaan maahan joko lyömällä, täryttämällä, puristamalla, ruuvaamalla tai näiden menetelmien yhdistelmillä. Maata syrjäyttämättömät paalut voidaan sijoittaa suojaputken avulla, kaivamalla tai poraamalla maahan paalukavanto. (Paalutusohje 2011, 15–16.)

3 LYÖTÄVÄT PIENPAALUT

3.1 Paalutustyöohje PO 2011

Paalutustyöohje on uudistettu viimeksi vuonna 2011. Ohjeen uudistamisen taustalla on paalutusta koskevien määräysten muuttaminen eurokoodeihin sopiviksi.

3.2 Lyötävät teräksiset pienpaalut

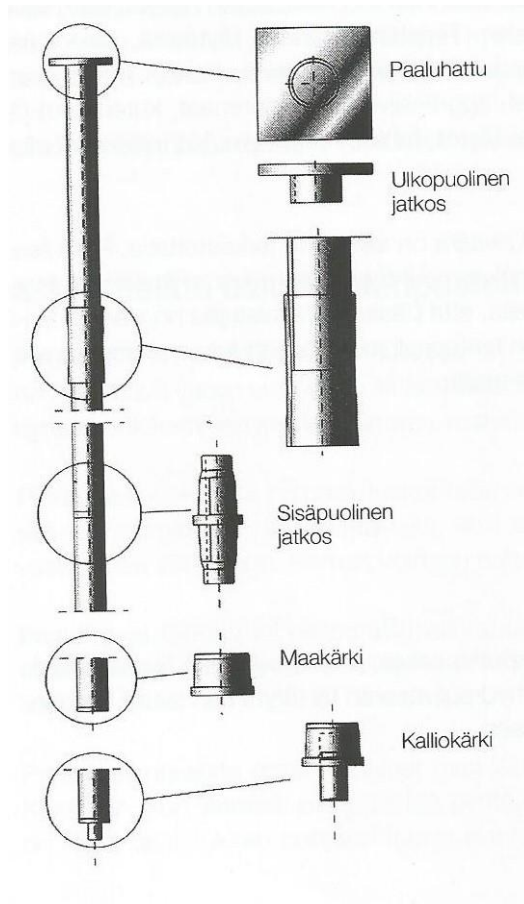
HTM Yhtiöt Oy:n teräsputkipaalut on valmistettu Paalutusohjeessa PO-2011 RIL 254-2011 määritettyjen paalumateriaali- ja paaluvälineohjeiden mukaisesti. Paaluissa käytetty rakenneputki on EN 10219-1:n mukaisesti CE-merkitty. Lisäksi läpimitaltaan pienille HT-paaluille on myönnetty VTT:n sertifikaatti VTT-C-11214-14. Paalutuotteiden valmistuksessa noudatetaan standardeja EN1090-1 ja EN1090-2; laadunvalvonnasta vastaa Inspecta. Kaikista paalumateriaaleista toimitetaan standardin SFS-EN 10204 tyyppin 2.2 tai 3.1 mukainen aineistodistus. (HTM 2014, 3.)

Teräspaalun rakenne koostuu putkesta, paalujatkoksesta, kärkikappaleesta ja paaluhatusta (Kuva 1). Paaluputken valmistukseen käytetty teräslaji on EN10219-1:n mukainen S460MH. Putken minimimytötoluudeksi on määritetty 460MPa. (HTM 2014, 3.)

HT-paaluihin on saatavilla lyöntipaalun ulkopuolinen holkkijatkos. Holkkijatkoksia on saatavilla paalukokoihin HT90-HT220, ja ne täyttävät PO-2011:n ja Eurokoodi EN1993-5:n kansallisen liitteen jäykkäliitoksille asettamat vaatimukset. HT-pienpaalut voidaan tarvittaessa jatkaa myös hitsaamalla. (HTM 2014, 3.)

Paalut toimitetaan työmaalle nipuissa, joissa on merkittyinä valmistaja, mitatiedot ja paaluputken teräslaji. HT-paalujen ja ilman jatkosholkkia toimitettavien putkipaalujen varastopituudet paaluilla HT90-HT140 ovat 6 metriä ja paaluilla HT140-HT320 12 metriä. Tarvittaessa paaluputkia voidaan myös valmistaa ja toimittaa määrämittäisinä asiakkaan toiveiden mukaisesti. (HTM 2014, 3.)

HT-paaluihin on saatavilla PO-2011:n vaatimukset täyttäviä maa- ja kallio-kärkiä. Vinoille kalliopinnoille sekä runsaasti kiviä sisältävään maahan lyötäessä suositellaan kalliojärjen käyttöä. Kalliojärki estää vinoilla pinnoilla paalun luiskahtamisen sivusuunnassa ja auttaa paalua läpäisemään kiviset maakerrokset. (HTM 2014, 3.)



Kuva 1. Teräspaalun rakenne (Jääskeläinen 2009, 108).

3.3 Teräsbetonipaalut

HTM Yhtiöt Oy:n teräsbetonipaalujen suunnittelussa on huomioitu useiden julkaisujen ja ohjeiden säännöt ja määräykset. Näitä julkaisuja ovat:

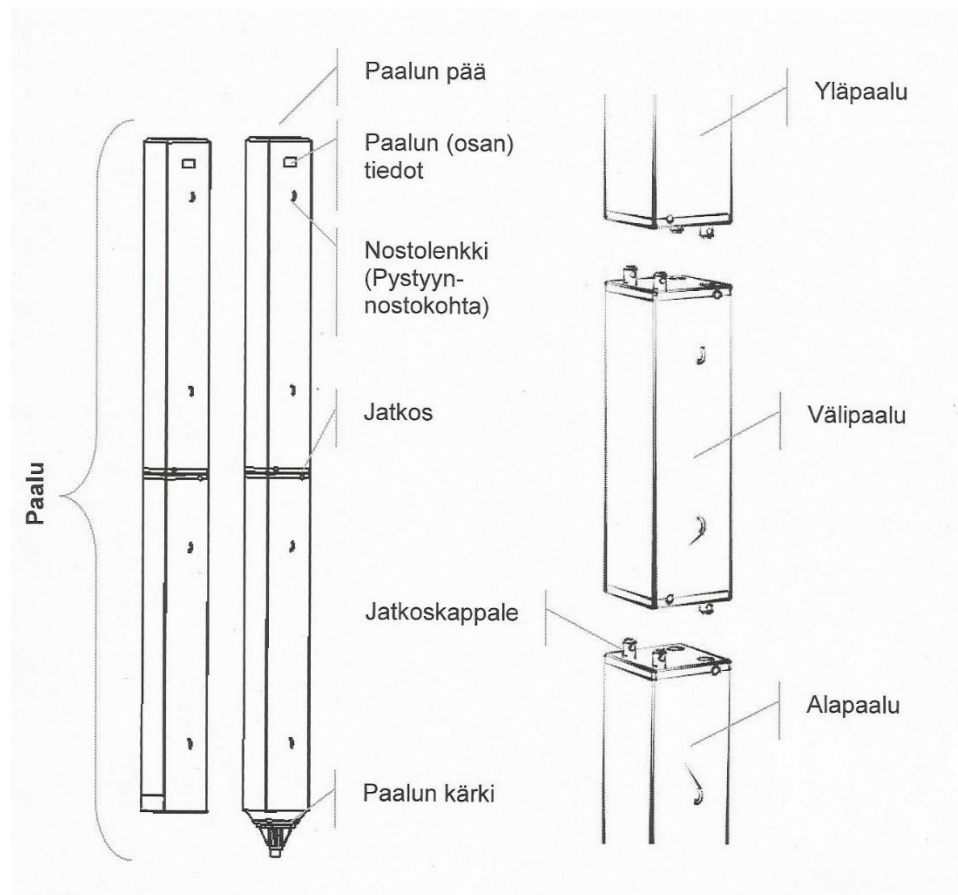
- SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu
- SFS-EN 12794 + A1 Betonivalmisosat. Perustuspaalut
- SFS-EN 12699 Pohjarakennustyöt. Maata syrjäyttävät paalut
- SFS-EN 13369 Betonivalmisosien yleiset säännöt
- Paalutusohje PO-2011. (RIL 254-2011 2011.)

Lisäksi paalut ja niissä käytettävät varusteet ja tarvikkeet valmistetaan tehdasolosuhteissa riippumattoman laadunvalvojan valvonnassa. Teräsbetonipaalun rakenteeseen kuuluvat paalu nostolenkkeineen sekä paalun päät, jatkokset ja kärjet (Kuva 2).

Teräsbetonipaaluja on uudistettu, ja nyt niillä on entistä monipuolisemmin käyttökohteita. Tyypillisimpiä paalutuskohhteita ovat liikenne- ja väylärakenteet, teollisuusrakenteet, kuten tehtaiden ja tuulivoimaloiden perustukset, sekä asuinrakentaminen, kuten kerros- ja pientalot. (Rakennusteollisuus RT Betoniteollisuus ry 2011, 3.)

Paalujen valmistukseen käytetään korkealuokkaisia raaka-aineita standardin SFS-EN 206-1 mukaisesti. Betonin lujuudeksi valitaan C35/45 (K-45) tai C40/50 (K-50). Paalujen raudoitteiden pääteräkset ovat standardien SFS 1215 tai SFS 1216 vaatimukset täyttäviä harjateräksiä.

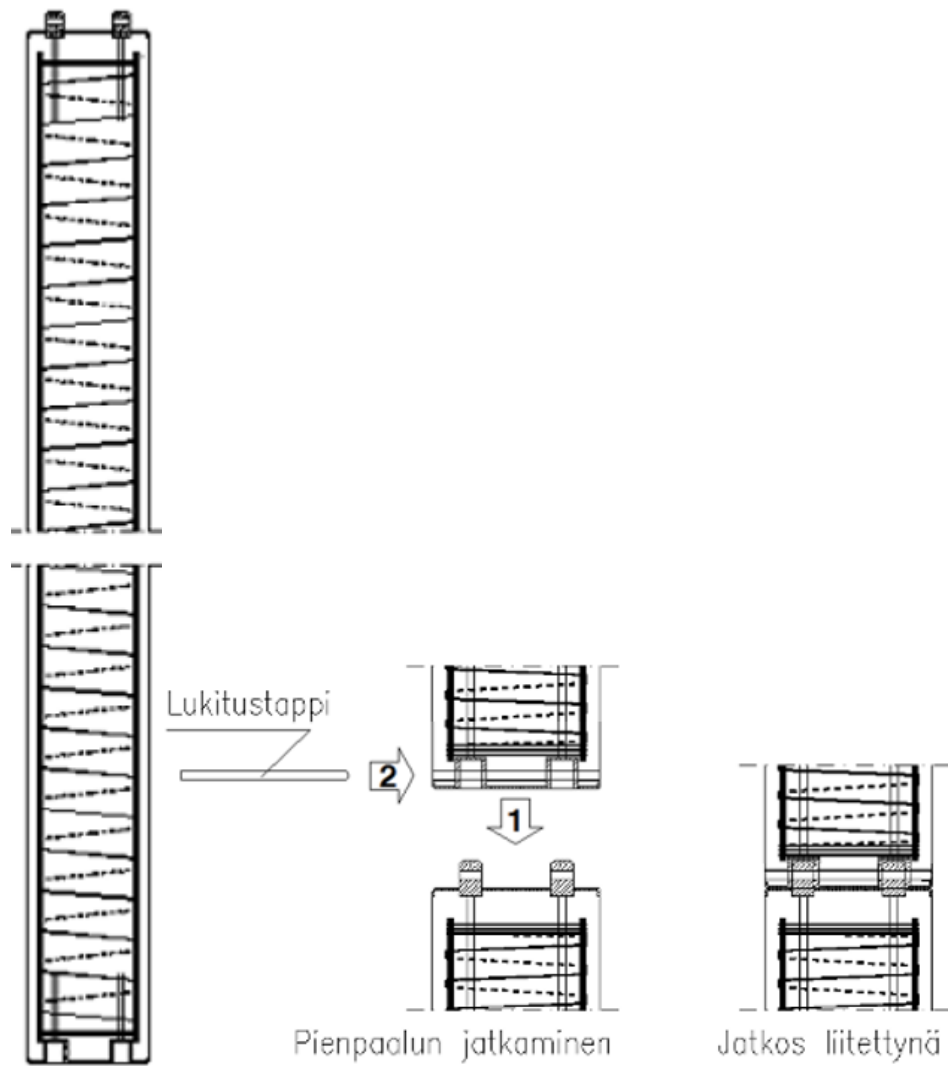
Teräsbetonipaaluja valmistetaan vakiopituuksina tasametrein. Minimipituus paaluille on kolme metriä ja maksimipituus vaihtelee paalun paksuuden mukaan 12 metrin ja 15 metrin välillä. (Rakennusteollisuus RT Betoniteollisuus ry 2011, 4–5.)



Kuva 2. Teräsbetonipaalun rakenne (Rakennusteollisuus RT Betoniteollisuus ry 2011, 5).

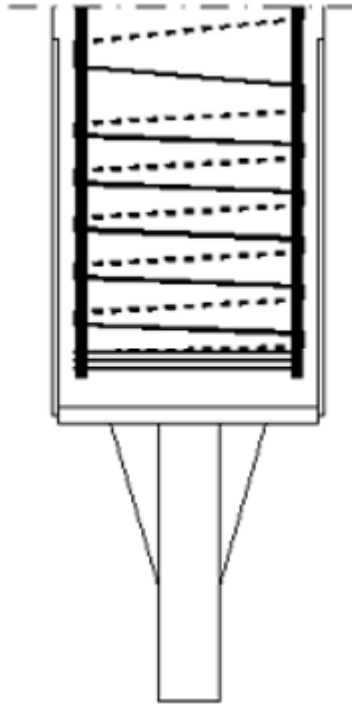
3.4 Luja-pienpaalu

Luja-pienpaalu on uusi paalutusratkaisu, joka on kehitetty omakotitalojen perustamiseen, mutta se soveltuu myös muuhun pienrakentamiseen. Luja-pienpaalu on vakiokokoinen teräsbetoninen jatkopaalu (Kuva 3).



Kuva 3. Lujapienpaalun rakenne (Lujabetoni 2013, 7 ja 35).

Valmiiksi asennetut jatkopalat mahdollistavat jo katkaistun paalun käyttämisen seuraavassa lyöntipisteessä. Katkaistun paalun päähän asennetaan muista teräsbetonipaaluista poiketen kalliokärki irrallisena (Kuva 4). Tämä poistaa riskin paalupituuksien määrittämisestä ja minimoi hukkan määrän.



Kuva 4. Luja-pienpaalun kalliokärki (Lujabetoni 2013, 36).

Luja-pienpaalu on varastotuote eikä vaadi erikoiskalustoa kuljetuksiin. Paalutustyöhön on kehitetty oma lyöntilaite, joka on helposti kiinnitettävissä normaaliin telakaivinkoneeseen. (Lujabetoni 2013, 34.)

4 PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU

4.1 Paalutyypin valinta

Kohteeseen parhaiten soveltuva paalutyyppi ja paalukoko valitaan mm. maaperän pohjasuhteiden, kuormitusten sekä ympäröivien rakenteiden perusteella. Mahdollisimman kustannustehokasta perustusratkaisua tavoiteltaessa kohteeseen kannattaa määrittää useampia paalukokoja sekä -tyyppejä, jotta perustus saadaan tarkasti optimoitua käyttökohteeseen sopivaksi. (HTM 2014, 6.)

Paalukokoa kasvattamalla saadaan perustukselle lisää kantavuutta paalun kestävyys kasvaessa. Paalukoon kasvaessa ja kalliokärkeä käyttämällä paalun tunkeutumiskyky kasvaa, joten kantavat maakerrokset saavutetaan suuremmalla varmuudella ja paalun vääntyminen ja sijaintivirheet pienenevät huomattavasti. (HTM 2014, 6.)

Paalun asentaminen lyömällä on yleensä kustannustehokkain asennustapa. Huomioitavaa on kuitenkin, että paalun asentaminen lyömällä ei välttämättä onnistu, jos maassa on paljon isoja kiviä, kalliopinnalla ei ole kitkamaakeroksia, kallio on lähellä maanpintaa tai se on kovin vino. Tällöin vaihtoehtona on poraamalla asennettavat paalut. Poraamalla paaluja voidaan asentaa lähes kaikissa maaperäolosuhteissa. Lisäksi määriteltäessä paaluperustuksen kantavuuksia ja paalukokoja on huomionarvoista, että poraamalla ehjään kallioon asennetulla paalulla kestävyys mitoitusarvo on jopa kaksinkertainen lyömällä asennettuun verrattuna. (HTM 2014, 6.)

4.1.1 Paalutustyöluokka

Paalutustyöluokka (PTL) määritellään kohteen geoteknisen luokan (GL) ja seuraamusluokan (CC) perusteella (Kuva 5). Paalutustyöluokka on luokitus, joka huomioi paalutuksen toteutuksen. Seuraamusluokat jakaantuvat kolmeen eri luokkaan CC1, CC2 ja CC3. Näistä luokka 3 tarkoittaa suuria seuraamuksia ihmishengille ja rakennuksille, luokka 1 vähäisiä vahinkoja. (PO-2011 2011, 99.)

Geotekninen luokka, ks. kohta 2.3	Seuraamusluokka, ks. SFS-EN 1990		
	CC1	CC2	CC3
GL1*	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

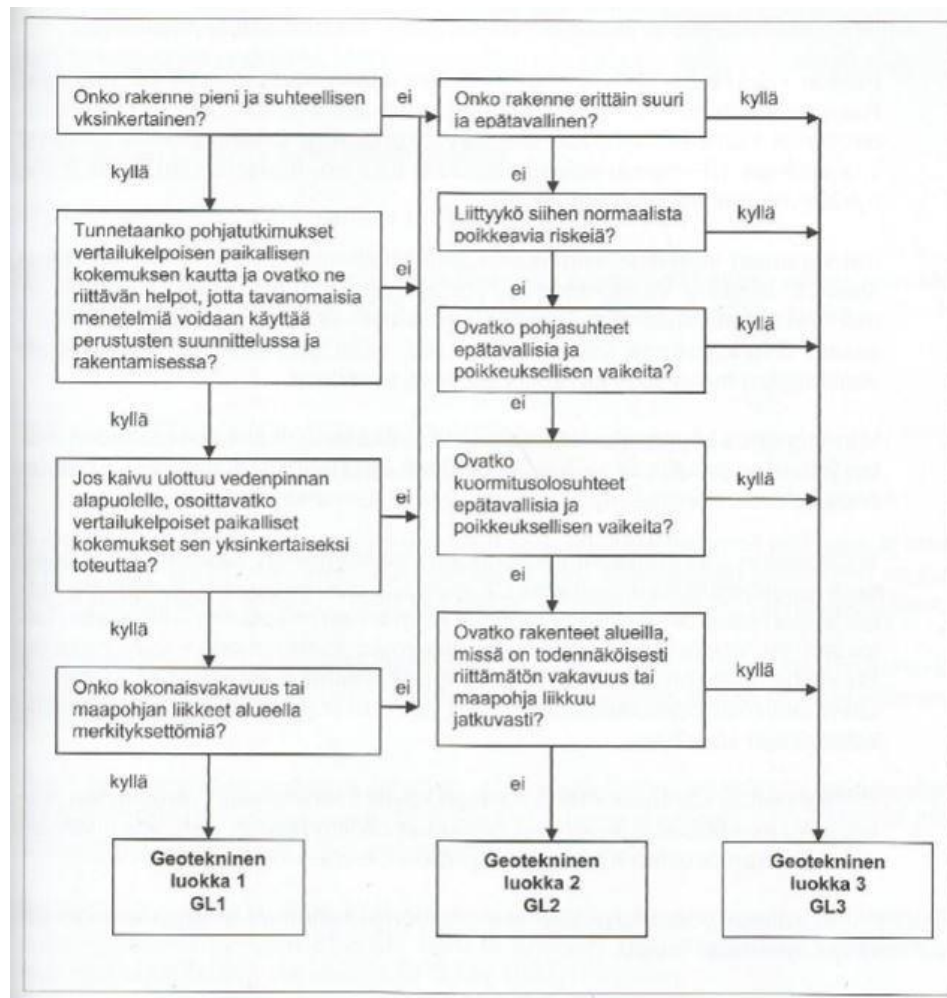
Kuva 5. Paalutustyöluokan määrittäminen geoteknisen ja seuraamusluokan avulla (PO-2011 2011, 100).

Valtaosa kaikista hankkeista määritetään kuuluviksi paalutustyöluokkiin PTL2 tai PTL3. Pientalokohteissa (90–140 mm) suositellaan pääosin käytettäväksi luokkaa PTL2. Suuria paalumääriä sisältävät hankkeet, kuten aluerakentamishankkeet tai hankalia pohjaolosuhteita sisältävät hankkeet, kannattaa suorittaa käyttäen paalutustyöluokkaa PTL3. (HTM 2014, 6.)

Haluttaessa pienentää paalutuksen ympäristövaikutuksia tai paalupisteiden määrän kasvaessa olennaisesti kannattaa harkita paalutustyöluokkaa PTL3. Tällöin paalunkestävyyden suuremmasta mitoitusarvosta johtuen on mahdollista vähentää paalujen lukumäärää jopa viidenneksen verrattuna paalutustyöluokka 2:seen. Poraamalla suoritettava paalutus voidaan suorittaa alimman seuraamusluokan ja geoteknisen luokan sallimaa paalutustyöluokkaa käyttäen. (HTM 2014, 6.)

4.1.2 Geotekninen kestävyys

Geoteknisen kestävyys suunnittelussa käytetään kolmea eri geoteknistä luokkaa (Kuva 6). Geotekniseen luokkaan GL1 kuuluvat kallio- tai moreenialueet sekä karkearakeisten maalajien alueet. Luokkaan GL2 kuuluvat maat, joihin ei liity erityisen vaativia pohja- tai kuormitusolosuhteita. Geotekniseen luokkaan GL3 kuuluvat suuret ja epätavalliset rakenteet, joihin liittyy riskejä. Lisäksi siihen kuuluvat kohteet, joissa on vaikeat pohja- tai kuormitusolosuhteet. (PO-2011 2011, 28.)



Kuva 6. Kaavio geoteknisen luokan määrittämisestä (PO-2011 2011, 29).

Geoteknistä kestävyyttä mitattaessa mittauksen tulee perustua johonkin seuraavista menetelmistä:

- staattinen koekuormitus
- dynaaminen koekuormitus
- kokemusperäiset tai analyttiset laskentamenetelmät
- vastaavanlaisen kohteen tuloksien vertailu. (PO-2011 2011, 53.)

4.1.3 Rakenteellinen kestävyys

Lyömällä asennettavien paalujen rakenteellista kestävyyttä laskettaessa tarkastellaan kolmea osa-aluetta. Iskumaisella rasituksella asennetun rakenteen ja paaluvarusteiden tulee kestää PO-2011:n taulukon 4.19 (Kuva 7) vaatimukset. (PO-2011 2011, 101.)

Paalun materiaali	Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoima asennettaessa $F_{c;lyönti}$	Suurin kestävyuden ominaisarvo $R_{k;geo;max}$
Teräspaalu	$\leq 0,9 \cdot f_{yk} \cdot A_s$	PTL3: $R_{k;geo;max} \leq F_{c;lyönti}$ PTL2: $R_{k;geo;max} \leq 0,8 \cdot F_{c;lyönti}$ PTL1: $R_{k;geo;max} \leq 0,6 \cdot F_{c;lyönti}$
Teräsbetonipaalu	$\leq 0,8 \cdot f_{ck} \cdot A_c^a$	PTL3: $R_{k;geo;max} \leq F_{c;lyönti}$ PTL2: $R_{k;geo;max} \leq 0,8 \cdot F_{c;lyönti}$ PTL1: $R_{k;geo;max} \leq 0,6 \cdot F_{c;lyönti}$
Puupaalu	$\leq 0,8 \cdot f_{c,0,k} \cdot A_{min}$	PTL3: Ei käytetä PTL2: $R_{k;geo;max} \leq 0,8 \cdot F_{c;lyönti}$ PTL1: $R_{k;geo;max} \leq 0,6 \cdot F_{c;lyönti}$

Kuva 7. Geoteknisen kestävyuden ominaisarvon maksimi-arvo lyömällä asennettavilla paaluilla ja suurin keskeinen lyöntivoima (PO-2011 2011, 101).

Paalurakenteen käytönaikainen kestävyys ja maan murtuminen tulee tarkastaa PO-2011:n kohdan 4.10 valmiiksi laskettujen mitoitusarvojen avulla. Samalla lasketaan aksiaalisesti kuormitetun paalun nurjahduskestävyys PO-2011:n kohdan 4.7.5 mukaisesti. (PO-2011 2011, 106.)

Paaluihin kohdistuu niiden elinkaaren aikana korroosiota. Teräspaaluille tavanomaisissa olosuhteissa ulkopinnan korroosioksi lasketaan 1,2 mm sadassa vuodessa. Sisäpinnan korroosiota ei tarvitse ottaa huomioon, jos teräspaalu täytetään betonilla tai sen alapää on suljettuna. Korroosiovarat on esitetty standardissa 1993-5. Betonipaalut mitoitetaan yleensä 100 vuoden käyttöikänsä, ja sitä säädellään suojabetonikerroksen paksuutta kasvattamalla. (HTM 2014, 8.)

4.1.4 Kuormat

Paalutusta suunniteltaessa valitaan erilaisia mitoitusilanteita, ja niiden valinnassa tulee ottaa huomioon erilaisia ennalta valittuja kuormituksia. Käytettävien mitoitusarvojen tulee vastata standardin SFS-EN 1991 mukaisia

arvoja, jotka ovat lisäksi soveltamisohjeineen sisällytetty myös julkaisuun RIL 201-1-2008. Laskettavien kuormien tulee vastata toteutuvaa tilannetta, ja tarvittaessa otetaan lisäksi huomioon rakenteen, perustuksen ja maapohjan välinen yhteistoiminta. (PO-2011 2011, 47–48.)

Lisäksi mitoituksessa otetaan huomioon kuormiin sisällytettäviä tekijöitä, joita ovat muun muassa:

- pysyvät ja hyötykuormat rakenteista
- maan, kallion ja veden paino
- maanpohjan jännitykset
- veden ja jään paineet
- pintakuormat, kuten liikenne ja työkoneet
- rakentamisen aiheuttamat kuormat mukaan lukien kaivaminen ja läjittäminen
- maan liukumisen tai painumisen aiheuttamat siirtymät
- mahdollisten räjäytysten tai tärinän aiheuttamat siirtymät
- lämpöliikehdinnän ja roudan aiheuttamat kuormat
- maan painumisesta aiheutuva negatiivinen vaippahankaus
- perustusten epätasainen painuminen.

Mitoituksessa tulee tarkastella tilanteita, jotka sisältävät lyhytaikaiset ja pitkäaikaiset rasitustilanteet sekä niiden yhdistelmät kulloinkin soveltuvien osin. (PO-2011 2011, 47–48.)

4.1.5 Pohjatutkimukset

Maastotutkimuksen yleisiä vaatimuksia koskevat standardit SFS-EN 1997-1 ja SFS-EN 1997-2. Lisäksi pitää ottaa huomioon kansalliset standardit, kunnes käytettävissä on vastaavat eurooppalaiset standardit. Pohjarakennuskohteet jaetaan kolmeen eri geotekniseen luokkaan. Helppoissa pohjarakennuskohteissa (GL1) maastokatselmus varmistetaan vähintään paino- tai porakonekairauksella. Suositeltavin kairausmenetelmä on heijarikairaus. Vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL2) ja erittäin vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL3) käytetään painokairauksen lisäksi heijari-, puristin-, puristinheijari- ja porakonekairausa. (PO-2011 2011, 35–37.)

Aggressiivisen maaperän tutkimusta tarvitaan teräsbetonipaalujen osalta selvittämään vahingoittumisriskiä. Betonia syövyttäviä aineita ovat muun muassa happamat jätevedet, suolainen merivesi, eräät teollisuusjätteet ja rikkiä sisältävät maakerrokset. Maastotutkimuksesta tehdään standardien mukainen geologinen kuvaus, jonka tekemiseen on ohjeet Paalutusohje 2011:sta.

Maastotutkimusraportissa tulee olla yleisen geologisen kuvauksen lisäksi muun muassa seuraavia tietoja:

- maanpinnan korkeus kaikissa tutkimus- tai testauspisteissä sidottuna tunnettuun kansalliseen korkeusjärjestelmään
- tiedot suurista kivistä, lohkareista ja muista luonnonesteistä tai rakennetuista esteistä
- tiedot karkeista, erityisen läpäisevistä maa-aineksista tai onkaloista
- tiedot pehmeistä kerroksista, esim. saven tai turpeen kerroksista

- kantavan maakerroksen alla olevan pehmeän maakerroksen paksuus, taso ja ominaisuudet
- pohjaveden tai maapohjan aggressiivisuus, joka saattaa vaikuttaa paalujen materiaalin kestävyYTEEN
- kalliopinnan taso ja viettosuhteet sekä tyyppi ja laatu
- tiedot maa-aineksen tai jätteen sijainnista. (PO-2011 2011, 41–44.)

4.2 Paaluperustus

Työmaalla tehdyistä pohjatutkimuksista tarkastellaan kantavan maaperän tai kallion syvyyttä. Mikäli kantava pinta on yli 5 metrin syvyydessä, käytetään yleensä paaluperustusta. Kantavaan maaperään asennettujen paalujen päälle valetaan paaluantura, ja sen päältä voidaankin jatkaa rakentamista kuten muillakin perustamisvaihtoehdoilla.

Ennen paalutustyön aloitusta toteuttaja laatii paalutuksen toteutumis suunnitelman. Toteutumis suunnitelmasta tulee löytyä kaikki tarvittava tieto paaluperustuksen rakentamistavasta yksityiskohtaisesti. Toteutumis suunnitelmaan lisätään myös laadunvalvontasuunnitelma. Laadunvalvontasuunnitelma sisältää valvontaraportit, pöytäkirjat sekä mittaukset, mittaustavat, mittausten määrät ja tarkkuudet. (PO-2011 2011, 193.)

Toteutussuunnitelmassa esitetään mm tarvittava kalusto, käytettävät varusteet, mittaukset, ympäristöhaitat ja -vaikutukset, työturvallisuusasiat sekä kaltevuudet ja sijainnit. Yksityiskohtainen lista tarvittavista tiedoista löytyy paalutusohjeesta PO-2011. (PO-2011 2011, 193–194.)

4.2.1 Ympäristövaikutukset

Ympäristövaikutuksen laatu ja laajuus riippuvat paalutettavasta alueesta. Yleisesti paalutuksen ympäristövaikutuksina voidaan pitää maakerrosten siirtymistä ja/tai tiivistymistä. Maakerrosten huokosvedenpaine voi myös kasvaa paalutuksen takia ja mahdollisesti heikentää maakerrosten rakennetta. Maakerrosten siirtymät ja painumat on otettava erityisesti huomioon rakennettaessa jo aiemmin maahan asennettujen paalujen ja perustusvahvistuskohteiden läheisyydessä. (PO-2011 2011, 185–186.)

Paalutyypit, paalutusmenetelmä ja eri työvaiheet voivat vaikuttaa lisäksi paineelliseen pohjaveteen. Maakerroksien syrjäytymiseen voidaan vaikuttaa paalutyypin ja -koon valinnalla. Pienemmät ja ontot sekä porattavat ja kaivettavat paalut syrjäyttävät vähemmän maata kuin umpinaiset lyöntipaalut. Paalutustöissä noudatetaan ympäristön suojauksen osalta joko kansallisia tai eurooppalaisia standardeja. (PO-2011 2011, 185–186.)

4.2.2 Päästöt ja vaaralliset aineet

Kun työskennellään vesi- ja pohjavesialueilla tai niiden läheisyydessä, tehdään työalueella ja sen läheisyydessä tarvittavat suojaustoimenpiteet. Suojaustoimenpiteiden avulla pyritään estämään haitallisten öljyn, injektointi- ja huuhteluaineiden pääsy maaperään tai vesistöön. Vaara voisi aiheutua esimerkiksi paalutuskoneen mahdollisesta rikkoutumisesta tai muusta syystä. Muina varotoimenpiteinä suositellaan käytettäväksi helposti luonnossa hajoavaa ympäristöystävällistä öljyä. Uudenaikaiset, huolletut ja tehokkaat työkoneet taas vähentävät savukaasupäästöjä ja mahdollisia vuotoja. (PO-2011 2011, 257.)

Injektoinnilla tarkoitetaan perustusten alle sementillä tehtävää pohjanvahvistusta. Esimerkiksi luiska-alueita voidaan lujittaa sementti-injektoinneilla kaivuolosuhteiden helpottamiseksi. Vesitiiviyyden parantamiseen on erilaisia kemiallisia aineita, jotka lujittavat maaperää. Injektointi on myös työmenetelmä, jossa maata, rakenteita tai kalliota tiivistetään tai vahvistetaan siten, että huokostilaan tai rakoihin sijoitetaan täyteainetta. (Jääskeläinen 2009, 214.)

Käyttöturvallisuustiedote on laadittava ympäristölle vaaralliseksi luokitellusta tai ympäristölle vaaraa aiheuttavista kemikaaleista. Tiedotteen laatii kemikaalin valmistaja, maahantuoja, jakelija tai muu toiminnanharjoittaja. Työmaalla työnjohto huolehtii, että vaarallisten aineiden turvallisuustiedotteet ovat työntekijöiden saatavilla ja niihin liittyvät vaaratekijät ovat työntekijöiden tiedossa. (PO-2011 2011, 257.)

4.2.3 Korroosio

Paaluperustukset suunnitellaan yleensä kestämään sadan vuoden käyttöikää. Tämä täytyy ottaa huomioon paalujen seinämäpaksuuksia ja suoja-betonikerroksia päätettäessä.

Teräspaaluille on määritetty keskimääräiseksi korroosioksi maan sisällä vähintään 1,2 mm sadan vuoden aikana. Korroosion määrä kasvaa, mikäli maa ei ole tiivistä, maa on saastunutta tai maa-aines on aggressiivista luonnonmaata, kuten esim. turvetta tai suota. Suurinta määriteltyä korroosion arvoa käytetään, kun paalutus tehdään tiivistämättömään tuhka- tai kuonatäyttyöön. Silloin se on noin 5,75 mm / 100 vuotta (Kuva 8). Teräspaalujen korroosiosuojaus koostuu joko toimivasta peitteestä, kuten betonista tai uhrattavasta kerroksesta terästä. Lisäksi on myös erityisiä varotoimenpiteitä, kuten esimerkiksi suojaputket ja pinnoitukset. (PO-2011 2011, 114.)

Tavoite käyttöikä	5 vuotta	25 vuotta	50 vuotta	75 vuotta	100 vuotta
Tavanomaiset olosuhteet					
Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Tiivistämättömät ei-aggressiiviset kivennäismaatäytöt (savi, hiekkä, siltti...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tavanomaisesta poikkeavat tai aggressiiviset olosuhteet					
Saastuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnonmaat (suo, räme, turve...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämättömät, aggressiiviset täytöt (tuhka, kuona...)	0,50	2,00	3,25	4,5	5,75

Kuva 8. Korroosion aiheuttama keskimääräinen pinnan syöpyä (mm) (PO-2011 2011, 114).

Teräsbetonipaalujen korroosiosuojaus perustuu pitkälti suojabetonipeitteeseen. Raudoituksen betonipeitteen nimellisarvo on vähintään 25 mm. Olosuhteiden huonontuessa kasvatetaan betonipeitettä vastaamaan ympäröiviä pohjaolosuhteita. (PO-2011 2011, 115.)

4.2.4 Melu ja värinä

Paalutustyöstä syntyy lähes aina melua ja värinää rakennuspaikalla. Värinän ja melun syntymiseen voidaan vaikuttaa jo suunnitteluvaiheessa, kun valitaan paalutyyppisiä ja asennusmenetelmiä. Paalutyypeistä puristuspaalut aiheuttavat yleensä vähäisimmän melun ja värinän. Suunnitelma-asiakirjoihin määritetään jokaiselle rakennuspaikalle omat tapauskohtaiset värinän raja-arvot. Värinän raja-arvojen määrittämiseen voidaan käyttää paalutusohjeessa määriteltyjä kaavoja ja niihin sisältyviä ohjeita. Samalla tutkitaan myös tarpeet ympäristön katselmuksille ja riskianalyysille. Riskianalyysi tulee suorittaa ennen paalutuksen aloitusta. (PO-2011 2011, 188.)

Erityisen suurta maanpinnan heilahtelua saattaa syntyä paalutuskoneen liikkuessa pehmeää maakerrosta peittävän kuivakuoren tai routakerroksen päällä. Heilahtelua saattaa syntyä myös, kun asennetaan lyöntipaalua kyseisen roudan tai kuivakerroksen läpi tekemättä siihen ensin reikää. Värinää ja heilahteluun voidaan vaikuttaa keventämällä asennuskalustoa ja lyöntilaitetta sekä pienentämällä paalun poikkileikkausta. Muita keinoja ovat mm. PDA-mittauksella optimoitu lyöntienergia ja keskeiset iskut lyöntipaalutuksessa. (PO-2011 2011, 190.)

Paalutuksen melutasojen ylärajat määrittelevät viranomaiset, ja niitä mitataan viranomaisen hyväksymällä tavalla. Työmaa saattaa sijaita alueella, jossa muu toiminta alentaa sallittua melutasoa. Tilapäisestä melua aiheuttavasta työstä täytyy tehdä ilmoitus viranomaisille. Melutasoon voidaan vaikuttaa käyttämällä uudenaikaisia hydraulijärkäleitä ja täryttimiä. Melutasoa voidaan pienentää myös sopivan iskutyynyn valinnalla sekä paalutustyöalueen ja melulähteen eristämällä. (PO-2011 2011, 191.)

4.2.5 Kaltevuudet

Paalun yläpäähän kohdistuvia vaakakuormia tai momentteja pyritään välttämään. Näistä aiheutuu rasituksia, joista seuraa paalujen taipumista. Paaluja tulisikin kuormittaa vain paalun suuntaisilla voimilla. (Jääskeläinen 2009, 74.)

Pienpaalut soveltuvat huonosti vastaanottamaan sivuttaisia kuormia, joten tästä johtuen pystysuorien paalujen lisäksi paaluryhmään lisätään sopiva määrä vinopaaluja. Vinopaalut voidaan asentaa haluttuun kaltevuuteen, mutta esimerkiksi osa paalutuskoneista ei pysty 4:1-kaltevuutta jyrkempiin kaltevuuksiin. (Jääskeläinen 2009, 78.)

Jos vinous rajataan arvoon 6:1, yleisimmät koneet pystyvät suorittamaan paalun asennuksen niin eteen kuin taaksepäin tehtävällä kallistuksella. Tällä saavutetaan se, että ahtaissa paikoissa paalutuskoneen ei tarvitse päästä paalun toiselle puolelle suorittamaan asennusta. Pienemmän kaltevuuden takia vaakakuormia vastaanottavat rakenteet vaativat lisäksi pystykuormaa tai oman painon, jotta kuormitusresultantti pysyy edellä mainituissa puitteissa. (Jääskeläinen 2009, 78.)

4.2.6 Pysty- ja vaakasuuntaiset siirtymät

Paaluja ympäröivässä maapohjassa voi tapahtua siirtymiä, jotka aiheutuvat maan noususta, viereisistä kuormista, konsolidaatiosta, maan poikittais-suuntaisista liikkeistä ja liiketilasta sekä plastisista muodonmuutoksista. Näiden ilmiöiden seurauksina paaluihin muodostuu negatiivista vaippahankausta, nousua ja venymiä sekä poikittaisia kuormia ja siirtymiä. (PO-2011 2011, 48.)

Näissä tilanteissa siirtyvän maapohjan geoteknisinä mitoitusarvoina tulee tavallisesti käyttää yläarvoa. Paalutusta suunniteltaessa on mahdollista käyttää kahta eri lähestymistapaa. Maapohjan siirtymää käsitellään kuormana tai mitoituskuormana käytetään maapohjasta paaluun välittyvän voiman yläraja-arvoa. (PO-2011 2011, 48.)

Kun maa paalun ympärillä painuu enemmän kuin paalu, syntyy paaluun negatiivista vaippahankausta. Toisin sanoen maa painuessaan vetää paalua mukanaan, jolloin paalu, joka on esimerkiksi lyöty kalliota vasten, joutuu ottamaan painuvan maan kitkan aiheuttaman kuorman vastaan. Negatiivinen vaippahankaus otetaan aina huomioon paalujen rakenteen mitoituksessa vaikuttavana kuormana. (PO-2011 2011, 49.)

Maan ja paalun nousu ovat myös huomioon otettavia tilanteita, sillä lähtökohtaisesti paalun nousua ei voida hyväksyä. Maan nousu voi johtua monestakin tekijästä, kuten esimerkiksi maan kaivusta, kuormitusten poistumisesta, routautumisesta tai viereisten paalujen lyömisestä. (PO-2011 2011, 52.)

Paalun ympärillä tapahtuva poikittaista kuormaa aiheuttava maanpohjan siirtyminen on otettava ulkoisten kuormien lisäksi myös huomioon. Poikittaista kuormitusta voivat aiheuttaa myös paalujen eri puolilla olevat penkereet ja leikkaukset. Lisäksi poikittaista kuormaa syntyy, jos paaluperustus on rakennettu luiskaan, jossa tapahtuu virumaa eli pitkällä aikavälillä tapahtuvaa painumista tai vinopaalutus on asennettu painuvaan maapohjaan. (PO-2011 2011, 52.)

4.3 Paalutustyö

Paalutustyötä tehtäessä tulee varmistaa ennakkoimenpitein työmaan ja sen ympäristön turvallisuus. Työssä pyritään minimoimaan tärinän ja melun ihmisiin aiheuttamat haitat sekä lähellä olevien rakenteiden vaurioituminen. Työhön valitaan kohteeseen sopivat paalut, moderni kalusto ja noudatetaan materiaalin käsittelyssä turvallisuusohjeita. Paalutustyö tulee tehdä aina hyväksytyn toteutussuunnitelman mukaisesti. (PO-2011, 2011, 196)

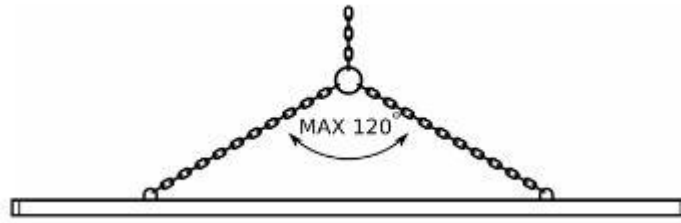
Koepaalutus tai aloituspaalun asentaminen tulisi suorittaa lähellä paikkoja, joissa on tehty maaperätutkimuksia. Näin saadaan selville, mikäli maaperäolosuhteet poikkeavat suunnitelmissa olevista ja tarvittaessa voidaan heti ryhtyä vaadittaviin toimenpiteisiin. Paalutustyö tulisi suorittaa siten, että maaperäolosuhteiden poikkeamat voidaan helposti havaita. Kaikki merkitykselliset poikkeamat raportoidaan ja otetaan huomioon paalutuksen suunnittelussa. (PO-2011 2011, 196.)

4.3.1 Paalujen vastaanotto, varastointi ja siirtäminen

Paalujen saapuessa työmaalle niille suoritetaan silmämääräinen vastaanototarkastus. Samalla todetaan, että toimitus vastaa tilausta. Mikäli havaitaan puutteita tai vahingoittuneita paaluja, niistä tulee ilmoittaa toimittajalle.

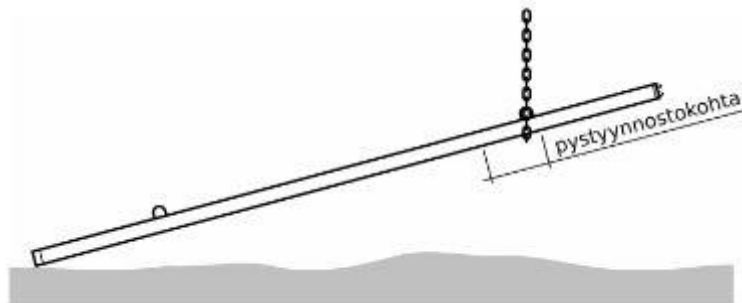
Varastoinnissa noudatetaan varovaisuutta, jottei paaluihin synny vaurioita. Betoniset paalut tulee varastoida nostolenkkien kohdalle asetettujen tukien varaan tai tasaiselle maalle rinnakkain. Kuljetuksen ja pinoon varastoinnin ajaksi paalut tulee kiinnittää huolellisesti vaurioiden estämiseksi. (HTM 2014, 15.)

Paaluja siirrettäessä suositellaan käyttämään ketjuja, jotka kiinnitetään paalujen molempiin nostolenkkeihin. Tämä tehdään kuitenkin niin, ettei mahdollisen haaranenkin ketjujen kulma ylitä 120 astetta (Kuva 9). (HTM 2014, 15.)



Kuva 9. Paalun siirto nostolenkkejä käyttämällä (HTM 2014, 15).

Siirrettäessä paalua vetämällä alustan pitää olla tasainen. Paalu nostetaan pystyyn kiristystavasti asennettua nostoketjua käyttäen. Nostoketju asennetaan paalun varteen nostolenkin kohdalle, mutta sitä ei saa kiinnittää nostolenkkiin (Kuva 10). (HTM 2014, 15.)



Kuva 10. Paalun nostaminen pystyyn (HTM 2014, 15).

4.3.2 Paalutus lyömällä

Paalutus aloitetaan teräspaalujen osalta asettamalla suunnitelmien mukainen kärkikappale paalun päähän. Teräsbetonisissa paaluissa kärjet asennetaan jo tehtaalla valun sisään. Paalut nostetaan suunnittelijan määrittämälle paikalle haluttuun kaltevuuteen, ja lyönnit ohjataan paalun pituusakselin suuntaisesti ja keskitetysti paalun päähän. Teräsbetoni- ja teräspaalujen lyönneissä on käytettävä esimerkiksi puista iskusuojaa paalun ja iskutyynyn välissä. Teräspaalujen asennukseen käytetään iskusuojaa vain tarvittaessa. (PO-2011 2011, 205–208.)

Upotuslyönneissä käytettävä iskuenergia riippuu kohteen olosuhteista. Lyöntijärkäleen iskunpituutta täytyy säädellä, jotta paalun painuma ei ylitä 150 mm lyöntiä kohti. Suuremmissa painumissa teräsbetoni- ja teräspaalu saattaa rikkoutua siihen kohdistuvien vetojännitysten takia. Teräspaalujen kohdalla yhden lyönnin suurin sallittu painuma on vain 100 mm, jotta vältetään mekaanisten jatkosten aukeamiselta. (PO-2011 2011, 205–208.)

Jos paalu kohtaa kiven tai lohkareen ennen suunniteltua upotussyvyyyttä, sitä lyödään varovasti 10–20 cm:n korkeudesta samalla seuraten, lujittuuko paalu paikalleen. Paalun pysähtyttyä suunnittelijoiden tulee harkita, voidaanko kyseinen paalu hyväksyä vai korvataanko se uudella. (Jääskeläinen 2009, 85.)

Loppulyöntisarjojen lyönti voidaan aloittaa, kun paalu on saavuttanut tavoitellun kiinteän pohjamaan tai kallion ja paalu selkeästi alkaa kiristyä paikalleen. I-luokassa loppulyöntisarjoja vaaditaan aina viisi sarjaa. III- ja II-luokassa vaaditaan vain kolme sarjaa paalun kiristyessä nopeasti paikalleen ja viisi sarjaa, jos kiristyminen on hidasta. Kalliokärjillä varustettuja paaluja naputetaan yli 300 iskua, jotta kalliotappi saadaan uppoamaan noin 60 mm kallioon. Näiden iskujen lisäksi lyödään testisarja ja muutama matala isku, jotta kärki asettuu varmasti kalliokuopan pohjaan. (Jääskeläinen 2009, 85.)

4.3.3 Paalun jatkaminen

Paaluja jatketaan, kun paalupisteen syvyys ylittää paaluelementin vakiopituuden. Jatkoksien taivutus- ja vetokestävyydet mitoitetaan paalua vastaaviksi. Lisäksi laskemat varmennetaan standardien mukaisilla kuormituskokeilla. Paalujen jatkokset eroavat toisistaan vertailtaessa eri materiaaleista valmistettuja paaluja. Lisäksi eri valmistajilla saattaa olla eri käytäntöjä.

Teräspaalujen ja Luja-pienpaalujen jatkaminen on yksinkertainen toimenpide, sillä molempiin on jatkokset asennettu jo valmistusvaiheessa. Teräspaalua jatkettaessa tulee varmistua siitä, että liitettävän putken pää on purseeton eli katkaisun yhteydessä syntynyt sula metalli on poistettu. Näin on syytä tehdä etenkin silloin, jos katkaisu on suoritettu työmaalla. Kiinnityslönnit on aloitettava varovasti ja samalla tulee varmistaa, että jatkettavat paaluputket ovat linjassa toisiinsa nähden. Mallit teräspaalujen liitoksista ovat opinnäytetyön kappaleesta 3.2. (HTM 2014, 12.)

Luja-pienpaalu jatketaan asettamalla uusi vakiomittainen paalu jo maahan lyödyn paalun päälle. Sen jälkeen varmistetaan, että ne ovat samassa linjassa ja liitetään ne toisiinsa tappiliitoksien. (Lujabetoni 2013, 34.)

Teräsbetonisia paaluja jatketaan pääasiassa samanlaisten liitosten avulla kuin Luja-pienpaaluissa. Erona mainittakoon, että kaikkiin teräsbetonisiin paaluihin ei asenneta valmiiksi jatkoksia. Tällöin tulisi siis tietää etukäteen syvyys, jonka paalujen tulisi saavuttaa. Jos käy niin, että paalu uppoaa syvemmälle kuin on suunniteltu eikä paalussa ole jatkoskappaletta, joudutaan kaivamaan paalun pää esiin. Sen jälkeen paalun päästä rikotaan teräkset näkyviin, jotka sidotaan paalun jatkeeksi tehtävän valun sisään. Tartuntateräket voidaan myös porata ja kiinnittää juotosbetonilla paaluun.

4.3.4 Katkaisu

Paalun katkaisutavan määrittelevät paalun materiaali ja tapa, jolla se liitetään yläpuoliseen rakenteeseen. Teräspaalut voidaan katkaista joko kulmahiomakoneella tai plasmaleikkurilla. Leikkauspinnan tulisi olla kohtisuorassa paalun pituusakselia vastaan, mutta alle kahden prosentin vinous on vielä hyväksyttävää. Heti katkaisun jälkeen on suositeltavaa asentaa paaluhattu, jotta paalun sisään ei putoa mitään sinne sopimatonta. (HTM 2014, 12.)

Teräsbetonipaalujen katkaisu tehdään yleensä timanttisahalla, mutta uutena vaihtoehtona on myös kaivinkoneeseen liitettävä katkaisulaite. Paalu katkaistaan suunniteltuun korkoon mahdollisimman kohtisuoraan paalun piti-
tuusakselia vastaan. Mikäli paaluun on tarkoitus jättää tartuntateräks
kiinni, paalusta hakataan nurkat pois, jolloin näkyviin tulleet teräks
tetaan sivuun ja poistetaan loput betonista.

Luja-pienpaalu katkaistaan samoilla periaatteilla kuin muutkin teräsbeto-
nipaalut. Mikäli katkaistu paalu on yli metrin mittainen, sillä voidaan aloit-
taa uusi paalupiste. (Lujabetoni 2013, 7 ja 35.)

4.3.5 Dokumentointi

Rakennettavan kohteen pääurakoitsija on velvoitettu pitämään tarkastus-
asiakirjaa kaikesta rakennusluvan alaisesta rakennustyöstä. Paalutuksen
osalta tämä tarkoittaa merkintöjen tekemistä katselmuksista sekä viran-
omaisten, suunnittelijoiden ja valvojien tarkastuksista. (PO-2011 2011,
249.)

Tarkastusasiakirjan yhteenvetoon kootaan kaikki paalutuspöytäkirjat, to-
teumapiirustukset, mittaus- ja koekuormitusraportit sekä valvontaraportit.
Asiakirja liitetään kokonaisuudessaan geotekniseen suunnitteluraporttiin.
Paalutusasiakirjoja arkistoidaan vähintään rakennuksen suunnitellun käyt-
töään tai rakennuksen purkamiseen asti. Dokumenttien, raporttien ja pöytä-
kirjojen tarkat sisällöt löytyvät Paalutusohje 2011:n kappaleesta 7. Paalu-
tustyö dokumentoidaan samalla tavalla paalujen materiaalista tai asennus-
tavasta riippumatta. (PO-2011 2011, 249.)

5 PAALUJEN VERTAILU

5.1 Paalutuksen suunnittelu

Pohja- ja ympäristöolosuhteiden mukaan tulee määrittää paalun tyyppi, koko ja asennustapa. Paalun tyyppin, koon ja asennustavan määrittämisessä huomioidaan eri paalumateriaalien antamat hyödyt ja haitat. Esimerkiksi ahtaassa paikassa, jossa tarvitaan runsasta kantavuutta, valitaan suuren kantavuuden omaava teräspaalu. Pohjaolosuhteet tulisi selvittää kattavalla pohjatutkimuksella, ja suositeltavaa olisi myös suorittaa koepaalutus työmaalla. Koepaalutus tehdään valittuihin paikkoihin ennen varsinaista paalutusta, jos aikaisempaa vertailukelpoista paalutustyökokemusta ei ole. (PO-2011 2011, 169.)

Paalutusta suunniteltaessa paikkaan, jossa on haastavat pohjaolosuhteet kuten isoja lohkareita tai kiviä sisältäviä maakerroksia, saatetaan joutua kasvattamaan paalukokoa. Tällä ehkäistään paalun käyristymistä ja rikkoutumista. Jos kalliopinnan päältä puuttuu kitkamaakerros, kalliopinta on lähellä maanpintaa tai kallion pinta on erityisen vino, suositeltavin vaihtoehto on asentaa paalut poraamalla. Kalliokärkien päätehtävänä on ankkuroida paalun alapää kallioon, mutta ne myös auttavat paalua tunkeutumaan maahan ja ohittamaan kiviä ja lohkareita. (HTM 2017, 7.)

5.2 Materiaali

Teräsbetoni- ja teräspaalut ovat molemmat maata syrjäyttäviä paaluja. Teräspaaluja pystyy hyödyntämään uudestaan, jos niissä ei esiinny lujuuteen tai pitkäaikaiskestävyyteen vaikuttavia vaurioita tai korroosiota. (PO-2011 2011, 135–149.)

Teräsbetonipaalujen betoniteräksen teräslajia valittaessa tulee kiinnittää huomioita raudoitteen koottavuuteen ja hitsattavuuteen. Betonin lujuus on vähintään C35/45 (K-45) tai C40/50 (K-50). Betonin valmistuksessa tulisi käyttää juomakelpoista vettä, muuten siitä tulee testata kloridi-, sulfaatti- ja humuspitoisuudet sekä hyväksyttävä veden käyttö. Myös lisäaineet ja seossuhteet on hyväksyttävä ennen käyttöönottoa. (PO-2011 2011, 153–154.)

Luja-pienpaalu on materiaaleiltaan samankaltainen muiden teräsbetonipaalujen kanssa, mutta poikkipinta-alaltaan se on muita pienempi. Hukan pienentämiseksi kaikkiin työmaille tuleviin paaluihin on asennettu jo valmiiksi jatkoskappaleet. Tämä vähentää paalujätettä, sillä kaikki yli metrin mittaiset pätkät voidaan käyttää seuraavassa lyöntipisteessä.

Normaalien teräsbetonipaalujen koot alkavat 250 x 250:sta, kun taas Lujapienpaalut ovat kooltaan 180 x 180. Teräspuutkipaalujen pienin koko on haluaisijaltaan 90 mm.

Materiaalikustannukset ovat suurin osa paalutuksen kokonaiskustannuksista. Paalutuksen suunnittelussa mietitään, voidaanko kustannuksiltaan pienintä vaihtoehtoa käyttää. Teräsbetoni on materiaaleista halvin. Jos rakennettava kohde on niin kevytrakenteinen, että pienimmänkin teräsbetonipaalun kantavuus on liian suuri, mietitään muita vaihtoehtoja.

5.2.1 Betonointi

Teräsputkipaalut voidaan halutessa valaa täyteen betonია. Tämä lisää paalutuksen kustannuksia, mutta samalla se lisää myös paalun kantavuutta. Lisäksi betoni teräspaalun sisällä hidastaa paalun hapettumisesta johtuvaa korroosiota. Betonilla on korkea emäksisyys (pH 13–14), minkä ansiosta teräksen pinnalle muodostuu tiivis oksidikerros. Betonointi myös poistaa paalun sisältä veden ja paalua hapettavan ilman. Veden poistaminen paalun sisältä poistaa riskin paalun jäätymisestä ja sen aiheuttamista muodonmuutoksista. (Finnsementti Oy n.d.)

5.2.2 Ankkurointi

Paalujen materiaaleja vertailtaessa ankkuroinnin kannalta havaitaan pari asiaa, joihin tulee kiinnittää huomiota. Rakennettaessa perustusta, jossa paalujen ja anturoiden kiinnitys toteutetaan nivelenä, eroavaisuuksia ei juuri ole. Paalut upotetaan valuun noin 5 cm sen enempää niitä kiinnittämättä.

Perustus, joka halutaan toteuttaa jäykkänä rakenteena, täytyy hitsata ja ankkuroida kiinteäksi rakenteeksi. Tästä johtuen betonisia paaluja käytettäessä paalujen yläpään raudat täytyy hakata betonin sisältä esiin ja kiinnittää ne anturan rakenteisiin. Tässä on otettava huomioon tarvittavat ankkurointipituuudet.

Teräspaaluja käytettäessä säästytään rautojen esiin hakkaamiselta, mutta kuten betonipaaluihinkin, täytyy betonisen anturan rauditus kiinnittää teräspaalun sisään esim. hitsaamalla. Ankkuriraudat voidaan myös valaa teräspaalun sisään betonoinnilla. Teräspaaluperustukseen käytetään myös usein teräspalkkirakennetta, jolloin ankkurointia ei tarvita. Palkit tulisi kuitenkin kiinnittää paaluhattuihin.

5.3 Kantavuus

Paalujen kokonaiskantavuuden määrittävät monta eri tekijää. Näitä ovat maan suljettu leikkauslujuus, paalun nurjahduskestävyys ympäröivän maakerroksen pettäessä, se, onko paalu jatkettu vai jatkamaton sekä paalun oma puristuskestävyys. Paalujen kestävyyydet ovat saatavilla paalun toimittajilta (Liitteet 2–4). Kyseisistä taulukoista löytyy eri kokoisten paalujen eri paalutustyöluokissa määritetyt sallitut ja murtorajatilojen puristuskestävyyydet.

Tarkasteltaessa suurin piirtein samankokoisten, mutta eri materialista valmistettujen paalujen kestävyyyksiä, voidaan todeta, että teräspaalulla on paljon suurimmat kestävyysmitoitussarvot.

Materiaali	Koko	Kestävyys
- teräsbetoni	250 x 250	463 kN
- teräspaalu	220/10	1233 kN
- Luja-pienpaalu	180 x 180	274 kN

Kuten ylhäältä on luettavista, teräspaalun kokoa voidaan pienentää reilusti. Teräsbetonipaalun kanssa sama kantavuus saavutetaan jo paalukooalla 115/8. Paalukoon pienentäminen on oleellista myös materiaalikustannusten kannalta, sillä paalujen metrihinnat ovat kyseisissä mitoissa samalla tasolla.

5.4 Kuljetus ja käsittely

Teräsbetoni- ja teräspaalujen eroavaisuudet kuljetuksessa tulevat pitkälti paalujen koko- ja painoeroista. Saman kantavuuden omaava teräsbetonipaalu painaa kymmenen kertaa enemmän kuin vastaava teräspaalu. Poikkipinta-alaltaan suurempi teräsbetonipaalu vie enemmän tilaa kuin teräspaalu, mutta mainittakoon, että kuljetuskaluston kantokyky loppuu ennen kuin kuorma on täysi. Näin ollen on helppo havaita, että teräspaalujen kuljetuskustannukset ovat huomattavasti pienempiä.

Paalujen kuljetusominaisuuksia vertailtaessa otetaan esimerkiksi pienin teräsbetonipaalu, kantavuudeltaan vastaava teräspaalu ja Luja-pienpaalu. Kantavuudet on otettu samasta puristuskestävyyskategoriasta samaa paalutustyöluokkaa (PTL 2) käyttäen.

Materiaali	Koko	Paino	Kestävyys
- teräsbetonipaalu	250 x 250	156 kg/m	463 kN
- teräspaalu	115/8	21 kg/m	502 kN
- Luja-pienpaalu	180 x 180	83 kg/m	274 kN

Lasketaan, kuinka paljon mahtuu yhteen kuormaan paaluja:

Puoliperävaunu	Kantavuus 32 tn
- teräsbetonipaalu	205 m
- teräspaalu	1523 m
- Luja-pienpaalu	385 m

Vertailua heikentää Luja-paalujen heikompi kestävyys, sillä niitä täytyy kuljettaa työmaalle 40 prosenttia enemmän. Keveytensä puolesta niitä saa kyytiin kuitenkin 53 prosenttia enemmän 250 x 250 -kokoiseen teräsbetonipaaluun verrattuna.

Paalujen käsittelyn eroavaisuudet muodostuvat painoeroista, mutta myös betonin huonosta vetolujuudesta johtuvasta herkkyydestä. Teräsbetonipaaluja tulisikin liikutella ja käsitellä varoen, jotta välttyttäisiin paalun kolhiintumiselta ja halkeamiselta.

Paalujen kuljetukseen ja käsittelyyn täytyy ottaa kantaa jo heti työmaasuunnitelmaa laadittaessa, erityisesti silloin, kun kyseessä ovat ahtaat työmaat.

Isommat paalutuskoneet vaativat pyörimistilaa noin 10 metriä. Lisäksi paalun pystyynnostaminen vaatii yli 20 metriä ainakin yhteen ilmansuuntaan paalutuspisteestä. Teräsbetonipaalut vaativat eniten tilaa, sillä ne nostetaan pystyyn vinssaamalla vaijerin avulla maata pitkin. Isompien teräspaalujen pystyynnosto tapahtuu samalla tavalla, mutta pienempiä pystytään niiden keveyden takia käsittelemään helposti vaikka kaivinkoneella. Luja-pienpaalut ovat myös tarpeeksi kevyitä kaivinkoneella käsiteltäviksi. Molemmille, teräs- ja Luja-pienpaaluille, on myös kehitetty kaivinkoneisiin sopivat lyöntikoneet, joten paalun asennus voidaan hoitaa samalla koneella kuin käsitelyt ja siirrot.

5.5 Lyöntityö

Teräsbetonipaalut painavat teräsputkipaaluja enemmän, joten lyöntityötä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon mahdolliset lyöntikoneen rajoitukset. Teräsbetonipaalujen asennukseen tulee valita isompi ja paremmalla nostokyvyllä varustettu lyöntikone kuin teräsputkipaaluille. Toinen ominaisuus, joka lisää räsitusta lyöntikoneelle, on betonisten paalujen karheen pinnan ja maan väliin muodostuva kitka. Teräspaalujen sileän ja poikkipinta-alaltaan pienemmän pinnan muodostama kitka on huomattavasti alhaisempi.

Teräsbetoni- ja teräspaalun lyönnit ohjataan pituusakselin suuntaisesti ja paalun päähän. Paalun ja iskutyynyn välissä tulee käyttää iskusuojana esimerkiksi puuta. (PO-2011 2011, 203–206.)

5.6 Katkaisu

Teräspaalu katkaistaan joko kulmahiomakoneella tai plasmaleikkurilla. Leikkauspinta tulee olla kohtisuorassa pituusakselia vastaan; tässä on sallittu maksimissaan kahden prosentin vinous. Paaluhattu tulee asentaa heti katkaisun jälkeen: näin estetään sinne kuulumattomien aineiden joutuminen. (HTM 2014, 12.)

Teräsbetonipaalu ja Luja-pienpaalu katkaistaan timanttisahalla tai uudemmalla tekniikalla, jossa kaivinkoneeseen liitetään katkaisulaite. Katkaisu tehdään mahdollisimman kohtisuorassa paalun pituusakselia vastaan. Jos halutaan jättää tartuntateräksiset paaluun kiinni, paalun nurkat hajotetaan pois, taivutetaan esiin tulleet teräksiset sivuun ja poistetaan loput betonista. (Lujabetoni 2013, 7 ja 35.)

Katkaisun jälkeen ylijääneet pätkät kerätään ja siivotaan pois työmaalta. Betonipaaluista jäävät pätkät, joissa ei ole jatkokappaleita, ovat aina jätettä. Kaikissa Luja-pienpaaluissa on jatkokappaleet valmiiksi, ja yli metrin mittaiset pätkät voidaan hyväksytysti käyttää uuden pisteen ensimmäisenä paaluna. Teräspaalun pätkät voidaan ottaa myös käyttöön, jos ne ylittävät vaaditun minimipituuden. Lisäksi jätteeksi menevistä teräspaalun pätkistä saa korvauksen.

6 YHTEENVETO

6.1 Tulokset

Tämä osio sisältää yhteenvetona jokaisen vertailtavan paalun hyviä ja huonoja ominaisuuksia. Paalujen ominaisuuksia on vertailtu suunnittelun, materiaalin, kantavuuden ja paalutustyön eri osa-alueiden kannalta. Paalutustyön suunnittelu on jokaisella paalutyypillä hyvin samankaltainen. Suunnittelun aikana päätetään paalumateriaalit ja paalutyypit sekä toimintatavat, mutta sen jälkeen suunnittelun eri vaiheet eivät muutu.

6.1.1 Pienteräspaalut

Teräspaalut ovat materiaaliltaan vertailukohteiden kallein vaihtoehto. Saman kokoluokan paaluista teräspaalut ovat kaikkein kestävimpiä. Käsitteilyn ja kuljetuksen osalta ne ovat kuitenkin kevyimmät ja helpoimmat käsitellä.

Suuremman kantavuutensa ansiosta voidaan käyttää pienemmän poikkipinta-alan omaavia paaluja, mikä tuo lisää muita etuja. Pienempiä paaluja mahtuu kuljetukseen huomattavasti suurempia määriä. Paalu uppoaa maahan pienemmällä vaivalla ja aiheuttaa vähemmän melua, tärinää ja maan syrjäytymistä. Löntikalusto voi olla myös reilusti pienempää, joten työalustan riittävä kantavuus on helpommin saavutettavissa. Pienempi kalusto vaatii myös vähemmän tilaa.

Teräspaalut ovat vertailun ainoat paalut, joiden asennukseen kuuluu betonointi. Betonointi lisää kustannuksia, ja se täytyy ottaa huomioon työvaiheita suunniteltaessa. Teräspaalun mahdollinen sisäraudoitus ja ankkurointitiraudat tulee asentaa ennen betonointia. Betonointi on kuitenkin oleellinen osa paalun korroosiosuojaa, joten sen käyttö on suositeltavaa.

Teräspaalun katkaisu on helpoin toteuttaa plasmaleikkurilla. Leikkaamisen jälkeen tulee poistaa purseet paalun sisältä, jotta paaluhattu saadaan paikoilleen. Katkaistut pätkät voidaan käyttää uudelleen, jos ne täyttävät eri paksuuksille määritetyt minimipituudet. Liian lyhyet pätkät toimitetaan teräsjätteen vastaanottajalle, joka maksaa niistä korvauksen.

6.1.2 Teräsbetonipaalut

Teräsbetoni on Suomen eniten käytetty paalumateriaali. Materiaaliltaan se onkin kaikkein huokein vaihtoehto. Teräsbetonipaalujen painon ja betonin huonon vetolujuuden vuoksi niiden käsittely on hankalampaa. Paalun siirtäminen, pystyynnostaminen ja lyöminen vaativat suurempaa kalustoa.

Teräsbetonipaaluilla saavutetaan suuriakin kantavuuksia, kunhan paalut saadaan lyötyä kallioon asti ja paalut säilyvät asennuksen ajan ehjinä. Be-

toni on terästä karheampaa, joten paalun pintaan muodostuu enemmän kitkaa. Suurempi kitka ja suurempi poikkipinta-ala vaativat suurempaa lyöntivoimaa, joka aiheuttaa tärinää, melua ja maakerrosten liikettä.

Katkaisu on käsin tehtynä raskas toimenpide. Paalu katkaistaan haluttuun korkoon timanttisahalla, jonka jälkeen paalu on valmis. Jos liitoksesta anturaan halutaan jäykkä, hakataan teräkset esiin paalun keskeltä ja ne ankkuroidaan anturan valuun. Ylijäämästä joutuu yleensä maksamaan poiskuljetuksen ja betonijättemaksun.

6.1.3 Luja-pienpaalu

Materiaaliltaan Luja-pienpaalu on samanlainen muiden teräsbetonipaalujen kanssa. Pienpaalu on kooltaan pienempi kuin muut teräsbetonipaalut, joten sen kantavuus on myös muita pienempi. Kuljetus ja käsittely ovat helpompia verrattuna suurempiin paaluihin. Pienen kokonsa ansiosta se soveltuu pienten ja kevyiden kohteiden paalutukseen. Koska paalutus voidaan toteuttaa kaivinkoneella, se soveltuu erinomaisesti myös ahtaille työmaille.

Jokaiseen Luja-pienpaaluun on tehtaalla asennettu jatkoskappaleet. Tämä vähentää hukan määrän lähes olemattomaksi, sillä uusi paalupiste voidaan aloittaa edellisen pisteen yli metrin mittaisella hukkapätkällä. Katkaisu toteutetaan loppulyöntien jälkeen normaaliin tapaan timanttisahalla, ja sitten siirrytään seuraavalle paalupisteelle.

Lyöntityöhön on kehitetty kaivinkoneeseen liitettävä lyöntilaite, joten työmaalle ei ole tarvetta hankkia erillistä paalujuntaa. Kevyet ja vakioipituudeltaan kuusimetriset paalut ovat helposti asennettavissa ja siirreltävissä pelkällä kaivinkoneella.

Maa- ja kalliokärjet asennetaan työmaalla tarpeen mukaan eikä valmiiksi tehtaalla. Tällöin kalliit lisäosat, kuten ylimääräiset kalliokärjet, ovat vielä palautettavissa tehtaalle.

6.2 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia paalujen kaikkia ominaisuuksia ja sitä kautta löytää parhaat käyttökohteet ja -tavat kullekin paalulle. Työn edetessä kävi ilmi, että eri materiaaleilla on huomattavia eroavaisuuksia.

Oman haasteensa vertailuun toi se, että vertailtavat paalut eivät olleet täysin samaa kokoluokkaa. Rakennuslalla kaikki vertailut tehdään yleensä kustannusten kautta, ja ne ovat joko täysin työmaakohtaisia tai muuten salaista tietoa. Paalutuksia voisi myös verrata ajatuksella euroa/metri, mutta se ei pelkästään riitä kertomaan kaikkia huomioon otettavia asioita.

Vertailussa selvisi, että jos paalutus päästään suorittamaan suurehkolle työmaalle, ilman lähellä sijaitsevia häiriintyviä tai vaurioituvia kohteita, niin silloin valitaan materiaaliltaan halpa teräsbetonipaalu. Jotta valinta pysyisi suuren kantavuuden omaavassa teräsbetonipaalussa, on paalutuksen päälle

tulevan rakennuksen myös oltava suuri ja raskas. Jos paalutettava kohde on kevyt rakenteeltaan, niin paaluksi kannattaa valita Lujan-pienpaalu.

Työmaan ollessa ahdas mutta rakennettavan kohteen ollessa raskas valitaan teräspaalu. Ahtauden lisäksi teräspaalun valintaa puoltavat työmaat, joissa halutaan hillitä tärinää ja melua. Teräspaalut soveltuvat betonipaaluja paremmin kiviseen maaperään, koska ne ohittavat maan sisällä olevia kiviä tehokkaammin eivätkä rikkoudu yhtä helposti. Teräspaalut myös syrjäyttävät vähemmän maata ja vaikuttavat vähemmän alueen huokosvedenpaineeseen.

Vaikka teräspaalulla on useitakin teräsbetonipaalua parempia ominaisuuksia, ne eivät riitä kompensoimaan teräspaalun kallista materiaalihintaa. Vasta kun teräsbetonipaalun asennus ei ole järkevästi toteutettavissa tai rakennettava kohde on pieni ja kevyt, valitaan teräspaalu.

Pienimmällä teräspaaluprofiililla (90/6,3) ja Lujan pienpaalulla on pitkälti samat ominaisuudet ja käyttökohteet, joten ne kilpailevat samoista asiakkaista. Mikäli tässäkin tapauksessa maakerrosten liikkeet, tärinä ja melu ovat ratkaisevia, niin teräspaalu vie voiton.

LÄHTEET

HTM (2014). HT-paalujen suunnittelu- ja asennusohje. HT-teräspaalut.

HTM (2017). HT-paalujen suunnittelu- ja asennusohje. HT-teräspaalut.

Jääskeläinen, R. (2009). *Pohjarakennuksen perusteet*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Lujabetoni (2013). Luja-pienpaaluohje.

Paalun betonointi. Finnsementti Oy. Haettu 3/2017 osoitteesta
<http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-suunnittelijalle/betonin-rasitusluokat-lyhyesti>

Rakennusteollisuus RT Betoniteollisuus ry (2011). *Tuotelehti. Teräsbetonipaalujen suunnittelu, työmaatoiminta ja paalujen valmistus*.

RIL254-2011 (2011). *Paalutusohje 2011*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.



TERÄSBETONIPAALUJEN PURISTUSKESTÄVYYS

Paalu Tilaustunnus	R _{sall, nuri} [kN] nurjahduksen mukaan						R _{sall, max} [kN]		
	C _{uk} [kPa]	P [%]	L [%]	5	7	10	PTL3	PTL2	PTL1
TB250a	L _{cr} / 150	100	0	328	401	A	457	411	374
		50	50	428	528	A			
		0	100	449	A	A			
	L _{cr} / 300	100	0	409	A	A			
		50	50	575	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB250b	L _{cr} / 150	100	0	343	419	A	515	463	421
		50	50	447	551	A			
		0	100	466	A	A			
	L _{cr} / 300	100	0	429	A	A			
		50	50	602	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB300a	L _{cr} / 150	100	0	476	582	A	657	591	537
		50	50	622	767	A			
		0	100	651	A	A			
	L _{cr} / 300	100	0	594	A	A			
		50	50	835	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB300b	L _{cr} / 150	100	0	496	606	A	734	660	600
		50	50	645	796	A			
		0	100	673	A	A			
	L _{cr} / 300	100	0	621	A	A			
		50	50	870	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB300c	L _{cr} / 150	100	0	550	674	A	848	764	694
		50	50	711	878	A			
		0	100	734	A	A			
	L _{cr} / 300	100	0	696	A	A			
		50	50	969	A	A			
		0	100	A	A	A			
TB350a	L _{cr} / 150	100	0	742	908	A	1139	1025	931
		50	50	959	1186	A			
		0	100	992	A	A			
	L _{cr} / 300	100	0	938	A	A			
		50	50	1307	A	A			
		0	100	A	A	A			

LUJA-PIENPAALUN PURISTUSKESTÄVYYS

Paalutyypin Lpp1						
Alkutaipum a δ_0	P _{sall} [kN] Maan suljettu leikkauslujuus, c _{uk} [kPa]			R _{sall} [kN]		
	5	7	10	PTL1	PTL2	PTL3
	L _{cr} /300	A	A	A	180	198
L _{cr} /150	176	A	A			
Paalutyypin Lpp2						
Alkutaipum a δ_0	P _{sall} [kN] Maan suljettu leikkauslujuus, c _{uk} [kPa]			R _{sall} [kN]		
	5	7	10	PTL1	PTL2	PTL3
	L _{cr} /300	A	A	A	230	254
L _{cr} /150	240	A	A			
Paalutyypin Lpp3						
Alkutaipum a δ_0	P _{sall} [kN] Maan suljettu leikkauslujuus, c _{uk} [kPa]			R _{sall} [kN]		
	5	7	10	PTL1	PTL2	PTL3
	L _{cr} /300	A	A	A	249	274
L _{cr} /150	263	A	A			

TERÄSPUTKIPAALUJEN PURISTUSKESTÄVYYS

Paalutyyppe	Alkutaipuma	5	7	10	Paalutyyppe	PTL1	PTL2	PTL3
HT90/6,3	Lcr/400	274	336	396	HT90/6,3	230	307	384
	Lcr/600	320	383	418	HT115/6,3	301	401	502
HT115/6,3	Lcr/400	421	511	551	HT115/8	376	502	627
	Lcr/600	489	539	580	HT125/6,3	336	449	561
HT115/8	Lcr/400	464	568	677	HT140/8	466	621	777
	Lcr/600	541	654	714	HT140/10	574	765	956
HT127/6,3	Lcr/400	504	587	629	HT170/10	700	934	1167
	Lcr/600	572	619	662	HT170/12,5	862	1149	1436
HT140/8	Lcr/400	653	799	882	HT220/10	925	1233	1542
	Lcr/600	758	860	929	HT220/12,5	1142	1523	1904
HT140/10	Lcr/400	710	870	1056	HT270/10	1163	1551	1939
	Lcr/600	829	1007	1115	HT270/12,5	1441	1921	2401
HT170/10	Lcr/400	975	1194	1353	HT320/10	1389	1852	2314
	Lcr/600	1134	1316	1426	HT320/12,5	1722	2296	2870
HT170/12,5	Lcr/400	1057	1295	1604				
	Lcr/600	1234	1501	1695				
HT220/10	Lcr/400	1519	1766	1892				
	Lcr/600	1720	1862	1990				
HT220/12,5	Lcr/400	1654	2026	2280				
	Lcr/600	1922	2219	2403				
HT270/10	Lcr/400	2175	2333	2477				
	Lcr/600	2294	2455	2598				
HT270/12,5	Lcr/400	2391	2809	3014				
	Lcr/600	2733	2962	3171				
HT320/10	Lcr/400	2704	2879	3036				
	Lcr/600	2848	3025	3177				
HT320/12,5	Lcr/400	3177	3493	3720				
	Lcr/600	3424	3679	3906				